

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Institut dopravy - Ústav letecké dopravy

Použití nových materiálů při výrobě moderních dopravních letounů  
Utilization of New Materials by Producing of Modern Transport Aircrafts

Student:

Petr Michálek

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Rostislav Horecký, Ph.D.

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Institut dopravy

## Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Michálek**  
Studijní program: B3712 Technologie letecké dopravy  
Studijní obor: 3708R036 Technologie letecké dopravy  
Téma: **Použití nových materiálů při výrobě moderních dopravních letounů**  
**Utilization of New Materials by Producing of Modern Transport Aircrafts**

Zásady pro vypracování:

1. Analyzovat současné typy dopravních letadel s ohledem na používané materiály k jejich výrobě.
2. Sestavit tabulky se skupinami nově vyráběných materiálů ve světě, které by byly s ohledem na své vlastnosti vhodné k výrobě dopravních letadel.
3. Porovnat do jaké míry se Vámi vybrané materiály vyskytují na dopravních letounech typu B 787 nebo A 380.
4. Představit další možné trendy použití nových materiálů ve výrobě dopravních letadel.

Cíl BP: Analyzovat aktuální stav použití nových materiálů při výrobě moderních dopravních letadel na příkladu letadel typu A380 a B787.

Seznam doporučené odborné literatury:

Holub, R., Wintř, Z.: Spolehlivost letadlové techniky (elektronická učebnice), Brno: VUT Brno, 2001.  
Výklad organizace údržby letadel leteckých údržbových organizací (JOB AIR Technics, Czech Airlines Technics, atd.)  
Nařízení komise ES č. 2042/2003 v aktuálním znění - část 145: Organizace údržby. Evropská komise, 2003

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Rostislav Horecký, Ph.D.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



*Aleš Slíva*

doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.  
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě.....13.5.2013

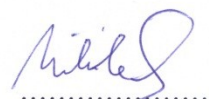
.....

podpis studenta

### Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 13.5.2013 .....



.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Petr Michálek

Adresa trvalého bydliště autora práce:

Vrchlického 968, Příbor 742 58

### **Poděkování**

Chtěl bych tímto poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Rostislavu Horeckému Ph.D a Josefu Hranickému za poskytnuté materiály a rady, které mi velice pomohly k vypracování této bakalářské práce.

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

MICHÁLEK, P. *Použití nových materiálů při výrobě moderních dopravních letounů*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2013. 50 s. Vedoucí práce: Ing. Rostislav Horecký, Ph.D.

Tato bakalářská práce se zabývá novými materiály pro stavbu moderních dopravních letounů. V této práci jsou popsány nejprve konstrukční materiály pro současné letouny a postupně také nové materiály, kterým bude patřit budoucnost v konstrukci letadel. Materiály jsou porovnány z hlediska jejich použití na příkladech letounů typu A380 a B787. V bakalářské práci je nastíněn další vývoj materiálů a zpracován komplexní pohled na problematiku použití materiálů při výrobě moderních dopravních letounů.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

MICHÁLEK, P. *Utilization of New Materials by Producing of Modern Transport Aircrafts*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport, 2013, 50 p. Thesis head: Ing. Rostislav Horecký, Ph.D.

The bachelor thesis deals with new material application in construction of modern airliners. The thesis firstly describes materials used on currently operated airplanes and new types of materials which are about to take over in this branch. From the perspective of its application the materials are compared on examples of A380 and B787 airplanes. The future development of new materials is foreshadowed in the thesis and it also contains detailed view on the issue of new material application in construction of airliners.



## Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	9
Úvod.....	10
Cíl bakalářské práce .....	11
1 Konstrukční materiály v letectví .....	12
1.1 Historie .....	12
1.2 Mechanické vlastnosti materiálů .....	13
1.3 Slitiny hliníku .....	16
1.3.1 Slitiny Al-Mg .....	17
1.3.2 Slitiny Al-Mg-Si .....	17
1.3.3 Slitiny Al-Cu a Al-Cu-Mg .....	17
1.3.4 Slitiny Al-Zn-Mg .....	18
1.3.5 Slitiny Al-Li .....	18
1.4 Titan a jeho slitiny .....	19
1.5 Kompozitní materiály.....	22
1.5.1 Rozdělení kompozitů: .....	23
1.5.2 Kontinuální materiály používané pro vyztužení .....	23
1.5.3 Skelná vlákna .....	24
1.5.4 Aramidová vlákna .....	25
1.5.5 Uhlíková vlákna .....	26
1.5.6 Diskontinuální materiály používané pro vyztužení.....	27
1.5.7 Kompozity za vysokých teplot.....	27
1.5.8 Aplikace kompozitních materiálů .....	29
1.6 Polymerní kompozitní materiály v letectví .....	30
1.7 Lamináty typu GLARE a ARALL .....	32
2 Použití vybraných materiálů na letounech A380 a B787.....	34
2.1 Airbus 380 .....	34
2.2 Boeing 787 Dreamliner .....	37

3	Prognóza dalšího vývoje materiálů v letectví .....	40
3.1	Výroba ultralehkého letounu .....	40
3.2	Dopravní letadla .....	41
3.2.1	Bombardier CSeries .....	43
3.2.2	Mitsubishi Regional Jet.....	44
	Závěr .....	45
	Seznam zdrojů.....	46
	Seznam obrázků .....	48
	Seznam grafů.....	49
	Seznam tabulek .....	50



## Seznam použitých značek a symbolů

Al prvek hliník

Mg prvek hořčík

Si prvek křemík

Cu prvek měď

Mn prvek mangan

Zn prvek zinek

Li prvek lithium

Ti prvek titan

V prvek vanad

Sn prvek cín

Zr prvek zirkonium

Mo prvek molybden

Cr prvek chrom

Nb prvek niob

Ni prvek nikl

C prvek uhlík

ICAO International Civil Aviation Organization

## Úvod

Letecké společnosti se v současnosti předhánějí v nižších cenách letenek. V této souvislosti se snaží minimalizovat náklady na provoz své letadlové flotily. Proto provozovatelé požadují po výrobcích dopravních letadel letoun, který bude mít co nejnížší náklady přepočtené na jednoho pasažéra.

Výrobci se snaží požadavkům leteckých společností vyhovět, a proto pracují na konstruování letadla, které by splňovalo jejich ekonomické požadavky. Řešení nacházejí v odlehčování letounů použitím nových materiálů. Dříve používané dřevo a plátno, bylo nahrazeno kovy, které v současné době nesplňují požadované hmotnostní kritéria. Proto výrobci hledají nové materiály, který by byly dostatečně kvalitní jako kovy, avšak lehčí. Řešení nacházejí v kompozitních materiálech, které se postupně prosazují na úkor kovových slitin.

V první části mé práce budete seznámeni s vlastnostmi materiálů a hlavně s materiály, které měly do dnešní doby největší uplatnění v konstrukci letadel, tedy především slitinami hliníku, titanovými slitinami a kompozitními materiály. Dále se zaměřím na pokročilé kompozity se skelnými, aramidovými a uhlíkovými vlákny a lamináty typu GLARE a ARALL. V další části porovnávám, do jaké míry jsou zastoupeny vybrané materiály na letounech typu A380 a B787. Na závěr budou nastíněny možnosti dalšího vývoje materiálů v letectví.

## **Cíl bakalářské práce**

Cílem bakalářské práce je seznámit se s konstrukčními materiály, které se v současnosti používají při konstrukci letadel, tyto materiály porovnat z hlediska jejich použití a určit do jaké míry se vybrané materiály vyskytují na dopravních letounech typu B787 a A380. Na závěr se pokusím určit, jakým směrem se bude v budoucnu vyvíjet výroba dopravních letadel z hlediska materiálového použití.

# **1 Konstrukční materiály v letectví**

## **1.1 Historie**

Počátky historie leteckých materiálů sahají až do roku 1903. V tomto roce vyrobili bratři Wrightové první řízený letoun, který byl složen ze dřeva, látky a několika drátů používaných na ovládání.

Postupně se do konstrukce letadel zapracovávaly kovové materiály, které nahrazovaly křehké a hořlavé dřevo. Během 1. světové války tedy létala především letadla smíšené konstrukce. Pomalu se začaly používat oceli a duraly, hlavně na zpevnění okrajových částí křídel.

Během 2. světové války došlo k obrovskému vývoji konstrukčních materiálů. Smíšené konstrukce trupů letadel byly nahrazeny kovovými skořepinovými konstrukcemi s trubkovými podélníky. Na konstrukci přepážek trupu byl použit dural a na motorové lóže ocelové trubky. Křídla byla tvořena jedním nebo dvěma nosníky a k nim byl za pomoci nýtů připevněn duralový plech. Ocasní plochy byly celokovové potažené duralovým plechem.

Po 2. světové válce se v konstrukcích letounů objevují slitiny lehkých kovů a titan. Začínají se používat sendvičové materiály, kompozity a lamináty. Všechny tyto materiály byly v průběhu let vyvíjeny a zdokonalovány, jako například ocel. Současná ocel se velmi liší od oceli používané na počátcích. Ocel použitá na nejnovějších letadlech je vysoce legovaná, pevnostní, metalurgicky čistá, antikorozi a únavově odolná. [10]

## 1.2 Mechanické vlastnosti materiálů

Materiály se během zpracování i používání opotřebovávají a namáhají. Mezi mechanické namáhání patří tah, tlak, krut, střih a ohyb. Tato namáhání v praxi nepůsobí jednotlivě, ale navzájem se doplňují a kombinují. Klasickým příkladem je křídlo letadla, které je současně vystaveno tahu, tlaku, ohybu i krutu. Materiál, ze kterého je křídlo vyrobeno se tedy vystavuje složenému namáhání. Pevnost, tvrdost, tvárnost a pružnost jsou příklady vlastností, které pomáhají těmto namáháním odolávat. Mechanické vlastnosti jsou samozřejmě zároveň ovlivňovány i různými vlivy. Typickým příkladem je teplotní vliv. Krystalická struktura materiálů se totiž s teplotou mění a z toho důvodu se mění i mechanické vlastnosti materiálů. Tvářením kovů za studena se deformují krystalické mřížky, a proto v nich vzniká vnitřní pnutí. To má za následek zmenšení tažnosti, ale zároveň zvýšení pevnosti látky.

Abychom mohli zhodnotit kvalitu jednotlivých leteckých materiálů je zapotřebí tyto materiály zkoušet. Díky těmto zkouškám získáme informace nutné pro návrh tvarů, rozměrů a materiálů leteckých součástí. Z hlediska působení síly na zkoušené těleso dělíme zkoušky:

### Statické zkoušky

Při těchto zkouškách působení sil trvá buď krátkou dobu (v řádu minut), nebo dlouhou dobu v rozmezí dnů až roků. Silové zatížení se zvětšuje pozvolna. U letadel používáme zkoušky funkčně důležitých částí, zkoušky do provozního zatížení, dále zkoušky tuhosti částí draku a zkoušky do porušení konstrukce, kdy zjišťujeme maximální únosnost konstrukce.

### Dynamické zkoušky rázové a cyklické

Při těchto zkouškách síla působí nárazově pouze zlomek sekundy. Při cyklických zkouškách se tento postup opakuje několikrát za sebou. Na letadle je zapotřebí provádět zkoušky celých konstrukcí, protože určováním životnosti jednotlivých částí nám nezajistí požadovanou životnost celého letounu, což bylo potvrzeno několika haváriemi. Křídla, trup, přetlakové kabiny jsou vždy zkoušeny z hlediska úplné nosné konstrukce. Tento typ zkoušek je ekonomicky velmi náročný.

### **Zvláštní technické zkoušky**

Výsledky zkoušek závisí na různých faktorech. Dělíme je na zkoušky za zvýšených, normálních a snížených teplot.

Samotné zkoušky při výrobě polotovarů neprobíhají na součástech, ale jsou prováděny na zkouškových vzorcích. Většinou jsou tyto vzorky ve tvaru tyčí, vyrobené ze stejného materiálu jako zkoumaná součást. [1]

Z těchto důvodů je třeba jednotlivé vlastnosti definovat a vypracovat pravidla a měřítka pro determinaci jejich velikostí. Lze měřit a definovat velké množství mechanických vlastností, ale technická praxe a ekonomické limity vedou k používání a zjišťování těch nejvíce charakteristických vlastností. Velký ohled je brán na poskytování optimální kvality za rozumnou cenu.

**Pro inženýrskou praxi mají význam především tyto vlastnosti:**

#### **Pevnost**

Tato vlastnost je definována jako maximální zatížení, které je daný materiál za daných podmínek schopen přenést, aby nedošlo k jeho porušení. Je to síla, která způsobí nevratnou plastickou deformaci. Ovšem to v praxi není požadováno, proto se snažíme minimalizovat zatížení jednotlivých dílů tím, že vyrábíme konstrukci tak, abychom rozložili zatížení na jednotlivé části. Musíme zajistit bezpečnost konstrukce. V součásti nebo konstrukci je třeba vždy vyvolat maximálně takové zatížení, které po skončení působení sil nezpůsobí trvalé deformace. Tyto deformace označujeme jako elastické (vratné).

#### **Plastičnost a tvárnost**

Tyto vlastnosti charakterizují schopnost materiálu plasticky se deformovat. V kořenech konstrukčních a technologických vrubů mohou vznikat případné špičky napětí. Je-li materiál dostatečně plastický, pomáhá relaxaci těchto eventuálních špiček. Ke zjišťování těchto vlastností využíváme výsledků kontrakce a tažnosti při zkoušce tahem.

## **Houževnatost**

Je to vlastnost charakterizující energii potřebnou ke zlomení součásti. Při ohýbání a nárazech se tedy v houževnatých materiálech nevytvářejí trhliny. Stoupá-li tvárnost a plastičnost materiálu, vzrůstá i houževnatost. Mezi houževnaté materiály patří všechny materiály obsahující dislokace, především tedy kovy, ale také plasty. Opakem houževnatosti je křehkost.

## **Tvrdost**

Tvrdost je velmi důležitou vlastností, kterou lze kontrolovat a vyžadovat u velkého množství leteckých součástí. Je to v podstatě odpor, kterým působí materiál proti vniknutí cizího tělesa. Výhodou je, že lze měřit tvrdost komponentu přímo na jeho povrchu a není zapotřebí používat zkušební tyče nebo vzorky. Často totiž nelze odebrat vzorky, ani vyrábět zkušební tělesa. Je to v podstatě jediná metoda mechanického zkoušení, která nezpůsobuje destrukci. Existují různé zkušební metody například podle: Vickerse, Brinella a Rockwella.

Dalšími důležitými vlastnostmi jsou např. **žárupevnost, tažnost, odolnost proti cyklickému zatěžování** apod.

Základní mechanické vlastnosti materiálu lze zjistit z tahové zkoušky za normální teploty. Díky tomu, lze vyselektovat vhodný materiál pro danou aplikaci a také identifikovat samotný materiál. Zkouška tahem až do lomu při dané teplotě se užívá pro určení meze kluzu a meze pevnosti, tažnosti a kontrakce za zvýšených nebo snížených teplot. [2]



### 1.3 Slitiny hliníku

Po dlouhá léta jsou slitiny hliníku používány pro stavbu letadel. Je to z důvodu jejich mnoha dobrých vlastností. Těchto vlastností dosáhneme přidáním některých prvků jako je měď, hořčík, křemík, mangan, zinek nebo lithium. V letectví se nejčastěji používají slitiny hliníku ve formě plechů nebo lisovaných profilů.

#### Výhody:

- Předností je především jejich nízká měrná hmotnost pohybující se v rozsahu 2470 až 2890 kg.m<sup>-3</sup> a také slitiny hliníku vykazují dobré pevnostní charakteristiky. Některé slitiny dokonce dosahují pevnostních vlastností ocelí.
- Některé hliníkové slitiny jsou také dobře svařitelné a vykazují dobrou tepelnou a elektrickou vodivost.
- Nízká cena ve srovnání s ostatními materiály.

#### Nevýhody:

- Obrovskou nevýhodou je malá tvrdost, která nezabraňuje poškození polotovarů nebo poškrábání hotových výrobků.
- U lehčích materiálů se projevuje špatná obrobitelnost.
- Asi největší nevýhodou je nutnost nanášet vrstvy hliníku na duralové plechy a tím zabránit případné korozi. A jelikož je dural nejpoužívanější hliníková slitina, dochází k nárůstu celkových nákladů na výrobu. Navíc při zahřívání duralu dochází ke zhoršení korozních vlastností a může dojít k tvorbě mezikrystalové koroze.
- Obecně platí, že přidáním mědi se snižují antikorozní účinky slitin.

#### Charakteristika jednotlivých slitin hliníku

Slitiny hliníku užívané v leteckém průmyslu mají velké využití. Podle druhu součásti také volíme způsob jejich výroby jako je tváření, lití nebo kování. Pevnost součásti lze také zvýšit vytvrzováním. Při vytvrzování se nejprve slitina ohřeje až do rozpuštění, potom se prudce zchladí a v závěrečné fázi slitina přirozeně stárne. Míra zpevnění závisí vždy na chemickém složení slitiny. Proto se nevytvřezují všechny slitiny, ale pouze ty, u kterých dojde k dostatečnému zvýšení pevnosti za předpokladu zachování ostatních užitečných vlastností.

### 1.3.1 Slitiny Al-Mg

Slitiny známé pod obchodním názvem hydronalium. Slitiny se vyznačují poměrně dobrou pevností, vysokou tvárností a vysokou odolností proti korozi. Z důvodu vysoké odolnosti proti vibračnímu namáhání se z této dobře svařitelné slitiny vyrábí především plechy a v omezené míře také trubky a dráty na nýty. Množství přidaného hořčíku se pohybuje v rozmezí 1% až 6%. K dosažení lepších vlastností se do obsahu přidávají stopové prvky manganu, chromu, titanu a vanadu do obsahu 1%.

Z této slitiny se na letounech vyrábí nádrže, olejová a palivová potrubí, kryty motoru a různé středně namáhané součásti. Také se z některých elektronů vyrábí nýty. Podobné využití má také slitina Al-Mn-Mg, případně bez hořčíku Al-Mn.

### 1.3.2 Slitiny Al-Mg-Si

Obchodní název těchto slitin jsou pantaly nebo také siluminy. Jako hlavní přísady se používají hořčík a křemík. Někdy se také přidává mangan nebo chrom, aby došlo ke zvýšení pevnosti. Ve srovnání s duraly vykazují nižší pevnost, ale větší tvárnost, vyšší odolnost proti korozi a lepší svařitelnost. Ze slitin 6009 a 6010 se vyrábějí kované součásti složitého tvaru, které vyžadují dobrou tvárnost za tepla i za studena. Typickým příkladem užití jsou závěsy křidel.

### 1.3.3 Slitiny Al-Cu a Al-Cu-Mg

Tyto slitiny jsou nejrozšířenějšími slitinami hliníku, používanými v leteckém průmyslu, z důvodu vysoké pevnosti a lomové houževnatosti. Chceme-li však dosáhnout vyšší žárupevnosti, lepší svařitelnosti a vyšší odolnosti proti korozi pod napětím, vytvrdíme Al-Cu s přídavkem manganu a získáme materiál 2219. Podobné vlastnosti vykazuje také materiál 2025, který je navíc obohacen křemíkem.

Do skupiny Al-Cu-Mg řadíme duraly (2014, 2017, 2024), které jsou při konstrukci letadel nejpoužívanějšími slitinami hliníku. Duraly postupně vytlačily z konstrukce letadel slitiny hořčíku (až 90 %) s hliníkem, známé pod obchodní značkou elektrony. Jako příměsi se do všech duralů přidávají mangan, železo a křemík, které zlepšují celkové vlastnosti. Dural označovaný 2024 vykazuje největší pevnost a výtečnou lomovou houževnatost, a proto je nejvíce používaným materiálem v leteckém průmyslu. Z této slitiny se modifikují další materiály 2124 a 2224, které obsahují méně železa a křemíku, proto mají vyšší lomovou houževnatost. Velkou nevýhodou duralů je však jejich nízká odolnost proti korozi. Aby se zabránilo korozi, musí se plechy plátovat čistým hliníkem anebo libovolnou korozně odolnou slitinou hliníku.

Využití je u této skupiny slitin rozmanité. Ze slitiny 2025 se vyrábí výkovky listů vrtulí letadel. Potřebujeme-li součást určenou pro práci za vyšších teplot, nebo jako konstrukční materiál ve formě plechů, desek nebo nýtů, použijeme materiál s označením 2219. Na nýty nebo středně namáhané části letounu je dostačující slitina 2014. Z nejpoužívanějšího duralu 2024 se konstruují potahy, žebra, přepážky, rámy, výztuhy, aerodynamické kryty, nýty a výkovky. Nýty se také vyrábí z duralu s označením 2117. Tento materiál je výhodný z důvodu sníženého obsahu mědi, a proto nedochází ke vzniku trhlin při pěchování závěrné hlavy nýtu během vytvrzování.

#### **1.3.4 Slitiny Al-Zn-Mg**

Tyto slitiny nemají jednotný obchodní název, nejčastěji jsou vyráběny firmami Alcoa a Alcan. Při normální teplotě jsou tyto slitiny nejpevnějšími konstrukčními slitinami hliníku. Avšak navzdory jejich vysoké pevnosti, nikdy nevytlačí duralové slitiny z konstrukcí letadel a to z důvodu nestálosti při napětí. Jsou-li slitiny Al-Zn-Mg vystaveny napětí dochází ke snižování odolnosti proti korozi a hlavně s narůstající teplotou rychle ztrácí svou pevnost. Přesto nachází uplatnění při konstrukci žeber, potahů, přepážek či podélníků.

#### **1.3.5 Slitiny Al-Li**

V některých literaturách označované jako litany. Od počátku je jejich vývoj orientován na letecký a raketový průmysl. Každé 1% lithia snižuje hustotu slitiny zhruba o 3% a zároveň zvyšuje modul pružnosti o přibližně 6%. Maximální obsah lithia ve slitině je 4%, poté dojde k nasycení. Lithium má mnoho dobrých vlastností ve slitinách. Zvyšuje pevnost, spolehlivost materiálu a zlepšuje houževnatost při nízkých teplotách. Avšak nevýhodou je tendence slitiny praskat při korozi pod napětím. Avšak tepelným zpracováním se dá tato nevýhoda potlačit na úkor snížení pevnosti.

Použití lithiových slitin 8090 a 2090 se odvíjí od výše finančních prostředků pro stavbu letadla. Cena je asi čtyřnásobná vzhledem k běžným slitinám. Proto se tyto slitiny používají na součástech, u kterých může dojít k výraznému snížení hmotnosti. Obvykle se aplikují na součásti nepodléhající únavovému namáhání a bez potřeby svařovat nebo obrábět jako jsou například náběžné a odtokové hrany křídel. [4]

## 1.4 Titan a jeho slitiny

Je to šedý až stříbřitě bílý, tvrdý a poměrně lehký kov. Titan patří do skupiny těžkotavitelných kovů, které se vyznačují především velkou pevností krystalické mřížky, tvrdostí, vysokou teplotou tavení a odolností proti korozi. Titan má hexagonální mřížku s těsným uspořádáním. Mezi jeho základní vlastnosti patří dobrá tepelná i elektrická vodivost. Vyznačuje se výjimečnou chemickou stálostí. Odolává působení vody a atmosférických plynů a také působení většiny běžných minerálních kyselin a roztoků alkalických hydroxidů. Titan je také netoxický a také nepodléhá magnetismu. Je biologicky snášen, proto se také využívá v lékařství.

I přes své vysoké zastoupení v zemské kůře byl čistý kovový titan po dlouhá léta velmi vzácným a drahým materiálem. Hlavním důvodem je skutečnost, že běžné hutní metody, které se užívají při výrobě jiných kovů, jsou v případě titanu neúčinné kvůli ochotě titanu reagovat za zvýšené teploty s vodíkem, kyslíkem, uhlíkem a dusíkem. A tyto prvky zvyšují i při malé koncentraci jeho křehkost a tvrdost a snižují jeho tvárnost, což je nežádoucí.[5]

Jak už bylo zmíněno, specifická pevnost spolu s dostatečnou odolností proti únavě a tečení spolu s lomovou houževnatostí jsou důvodem, proč je titan využíván v leteckém průmyslu. První zmínka o použití titanu v konstrukci letounu sahá až do roku 1952. V tomto roce začala výroba motorových gondol a protipožárních přepážek na letounech Douglas DC-7. V dnešní době se téměř žádný konstruktér letadel neobejde bez slitin tohoto kovu. Slitiny titanu mají také obrovské využití při výrobě vesmírných satelitů, raket a vesmírných stanic. Dnes už se titanové slitiny běžně užívají při výrobě leteckých motorů, různých odlitků a kovaných součástí. Pláště draku, protipožární přepážky, lopatky ventilátorů, náty, šrouby a pružiny jsou rovněž vyráběny z různých slitin titanu.



*Obr. 1 Příklad součásti vyrobené z titanu [6]*

## **Problematika obrábění titanových leteckých dílů**

Od roku 1980 se začal titan používat jako konstrukční materiál, nejen ve vojenském letectví, ale také v civilním odvětví. Největší uplatnění v této době měly slitiny hliníku a nikl-feritické slitiny. Avšak slitiny titanu jim začaly plnohodnotně konkurovat. Později byly ze slitin titanu vyráběny další části letounu, jako byly části křídel, trupu a díly podvozku. Později se uplatňují při výrobě prvků hydraulických systémů. Z tohoto důvodu bylo zapotřebí inovovat technologie obrábění nových slitin, aby byla dosažena požadovaná produktivita a toleranční přesnost.

Materiál označený Ti-6AL-4V je nejčastěji užívanou slitinou titanu v letectví. Titan se řadí mezi zpevňující materiály. Důvodem je vyšší tvrdost povrchové vrstvy, než je u neobráběného celku. V porovnání se srovnatelně tvrdou ocelí vznikají při řezání větší síly. Kvůli těmto řezným silám se řezný nástroj zahřívá, a proto se také rychleji opotřebovává. K tomu přispívá i daleko vyšší modul pružnosti než je tomu u oceli. Dále jsou zde problémy s rozměrovou přesností a také s vibracemi. Toto všechno způsobuje vyšší náklady na výrobu a snižuje celkovou produktivitu titanových slitin. [6]

Proto chceme-li vyrábět nějakou titanovou součást, je třeba vždy zvážit pro jakou aplikaci je určena a také jaké musí mít mechanické vlastnosti, abychom zajistili maximální využití slitiny. Samozřejmě se od toho odvíjí i cena.

## **Rotující součásti**

Nejdůležitějšími vlastnostmi rotujících součástí jsou vysoká pevnost a metalurgická stabilita při velmi vysokých teplotách. Z toho plyne požadavek na nízkou rychlost creepu a možnost predikce chování vzhledem k mezi pevnosti při tečení a nízkocyklovému opotřebovávání. Samozřejmostí je homogenní mikrostruktura a klíčem úspěchu je zamezení strukturálních vad.

## **Letecké tlakové nádrže**

Požadavkem je vysoká pevnost při nižších teplotách, svařitelnost a predikce lomové houževnatosti při obvyklých teplotách během užití. Opět je důležité řídit mikrostrukturu k zamezení vzniku vad. A je nezbytné kontrolovat obsahy intersticiálních prvků, které snižují celkovou tažnost a lomovou houževnatost. Mezi intersticiální prvky patří kyslík, dusík a uhlík.

### Letecké konstrukční prvky

Tyto prvky musí vykazovat vysokou pevnost a větší odolnost proti teplotním vlivům ve srovnání se slitinami hliníku. Musí mít vyšší korozní odolnost oproti mosazi a bronzu. Důležitá je snadná příprava a dobrá tvárnost. [7]

Složení slitiny	Popis vlastností	Použití
Ti-8Al-1Mo-1V	Nízká hustota, vysoká pevnost a výborná svařitelnost	Lopatky plynových turbín
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	Vysoká pevnost, výborná creepová odolnost, tažnost	Do 540 °C; plynové turbíny, součásti konstrukce letadel
Ti-6Al-4V	Nejrozšířenější ze slitin titanu; Aplikace do 315°C	Disky a lopatky turbín, součásti konstrukce draku letadel
Ti-6Al-6V-2Sn	Vysoká pevnost do 315°C	Konstrukce draku letadla
Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn	Vysoká pevnost, tvářitelnost za studena, dobrá svařitelnost	Spony, péra, konzoly, láhve hasicích přístrojů, atd.
Ti-15Mo-3Al-2,7Nb-0,2Si	Odolnost proti oxidaci do 650°C a creepu	Části kabin

*Tab. 1 Složení, vlastnosti a použití titanových slitin [7]*

## 1.5 Kompozitní materiály

Kompozit je makroskopická kombinace dvou nebo více různých materiálů. Důležité je, že se běžně nemísí a lze tedy mezi nimi pozorovat určitou hranici nebo rozhraní. Použitím různých tvarů a způsobů spojení, můžeme vytvořit kompozit, který se vlastnostmi odlišuje od charakteristik základních složek.

Existuje celá řada kompozitních materiálů, které jsou používány k nejrůznějším účelům, proto není snadné je obecně definovat. Jakákoliv změna ve struktuře způsobí okamžitou změnu specifických vlastností, a proto je třeba při výrobě dbát pevně stanovených výrobních postupů, aby nedošlo k nežádoucímu výsledku. Vždy je zapotřebí nejprve určit pro jakou aplikaci bude kompozit užíván a poté stanovit výrobní proces, případně vybrat k tomu vhodné typy materiálů.

### Základní parametry kompozitů

Každá matrice kompozitu by měla splňovat tyto základní požadavky:

- co nejlepší mechanické přenášení napětí, která na kompozit působí
- co nejmenší posun vláken
- dostatečnou tažnost
- malou tuhost, aby neomezovala práci vláken matrice
- jednoduchou přípravu

### Vlastnosti indikované u kompozitů

Pevnost a tuhost matrice je nižší než u vláken, proto jsou pružnější matrice používány jako prostředí přenosu zatížení, kterým jsou namáhána především vlákna, která vykazují vyšší pevnost a tuhost.

Ve srovnání s kovovými materiály musí kompozity vykazovat:

- vysokou pevnost a tuhost
- lepší vlastnosti při vysokých teplotách
- vyšší únavovou odolnost
- vyšší pevnost v tahu
- nižší rychlost tečení (creepu)
- nižší tepelnou roztažnost



### 1.5.1 Rozdělení kompozitů:

Podle složení matrice rozdělujeme kompozitní materiály:

- a) s kovovou matricí (angl. Metal matrix composites) - kovové pěny se stabilizující složkou, čistý kov nebo slitiny mohou také tvořit matici
- b) s organickou (polymerovou) matricí (angl. Polymer matrix composites) - matrice je nejčastěji tvořena z polyesterů, epoxidů, fenolů, polyimidů a melaminů
- c) se skelnou matricí (angl. Glass matrix composites)
- d) uhlík - uhlík kompozit (angl. carbon - carbon composites)

Podle charakteru zpevňující složky rozlišujeme kompozity zpevněné:

- a) kontinuálními jednosměrnými vlákny
- b) sekanými vlákny nebo whiskery
- c) částicemi

#### Kontinuální zpevnění

#### Diskontinuální zpevnění



*Obr. 2 Typy zpevňujících složek kompozitů [7]*

### 1.5.2 Kontinuální materiály používané pro vyztužení

Výztuže vláknových kompozitů jsou velmi tenké, avšak velmi dlouhé. Často jsou stejně dlouhé jako vyráběná součást sama. Existuje mnoho způsobů uspořádání těchto vláken. Například všechna vlákna vodorovně v jednom směru bez výrazného vrstvení. Dále se potom řady vláken na sebe kolmo vrství. Také se často proplétají, jak je tomu u rohoží z rákosu. To vše ovlivňuje výsledný charakter zpevnění. Kompozity vyrobené z vláken se vyznačují vysokou mechanickou pevností a to hlavně ve směru osy vláken. Pevnost těchto vláken obecně s klesajícím průměrem vlákna roste, což je na první pohled paradoxem. Vše je to způsobeno používáním speciálních metod

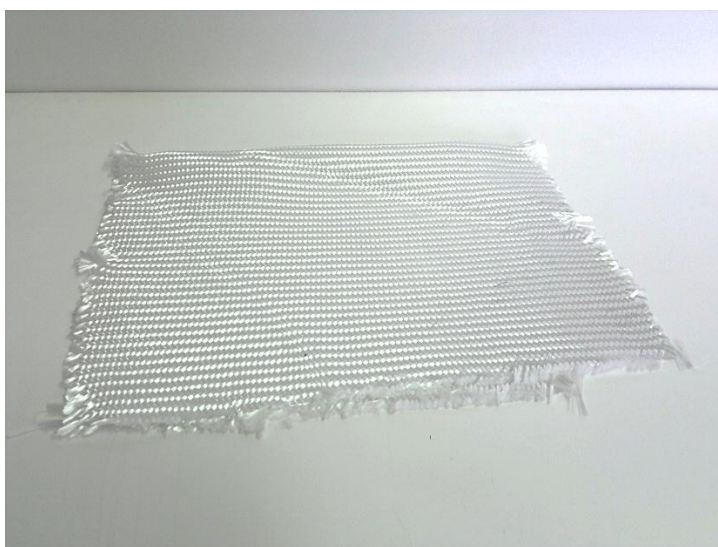
při výrobě. Tyto metody snižují výskyt a rozměry defektů v mikrostruktuře a také orientují defekty ve směru osy vlákna. A navíc u nekovových vláken se pevnost ještě zvyšuje, z důvodu jejich vhodné orientace kovalentních vazeb.[7]

Zpevňující vlákna dělíme podle charakteru materiálu:

- a) skelná
- b) aramidová
- c) uhlíková

### 1.5.3 Skelná vlákna

Skla ze sklovin C, D, E, S a L jsou základem pro výrobu většiny skelných vláken. Je to směs různých oxidů. Z historického hlediska existují 2 způsoby výroby skelných vláken. Starší způsob spočívá v roztavení sklářského kmenu do tvaru malých kuliček o velikosti maximálně 2cm při teplotě 1500°C. Tyto kuličky se tavily v kelímcích vyrobených z platiny a z těchto kelímků se následně vytahovalo skelné vlákno. V dnešní době jsou tyto 2 fáze sloučeny v jednu. Na jedné straně se taví sklářský kmen a na druhém konci jsou platinové vaničky, ze kterých se přímo vytahuje vlákno. Najednou se může vytahovat až 400 vláken. Všechna vlákna se navíjejí na buben a zároveň se lubrikují, aby při dalším zpracování lépe přiléhala k pryskyřici, či jiné matrici. Skelná vlákna se v praxi používají na místech, které vyžadují vysokou pevnost a dlouhou životnost.



*Obr. 3 Tkanina ze skelných vláken*

#### 1.5.4 Aramidová vlákna

Patří mezi polymerní vlákna. Ty obecně vykazují nižší měrnou hustotu než skleněná a uhlíková vlákna. Avšak co se týče pevnosti a především modulu pružnosti v tahu, tak se nemohou se skleněnými vlákny vůbec rovnat. Mezi nejznámější aromatické polyamidy patří Kevlar, který vynalezla společnost DuPont.

##### Charakteristika Kevlaru:

- Největší výhodou je schopnost plasticky se deformovat při působení síly kolmo na podélnou osu vlákna.
- Vyznačuje se nejnižší hustotou ( $1440\text{kg.m}^{-3}$ ) oproti standardním skelným a uhlíkovým vláknům.
- Výbornou vlastností je jeho rezistence vůči abrazi
- Nevýhodou je jeho vyšší cena oproti skelným vláknům.
- Vykazuje nehořlavost a odolnost proti vysokým teplotám (Kevlar 49 začíná měknout až při teplotě okolo  $520^{\circ}\text{C}$ ).
- K dokonalému prosycení vláken pryskyřicemi se někdy používá určité procento skleněných vláken.
- Nejnovější typ Kevlaru 129 má menší hmotnost, vyšší modul pružnosti a vyšší pevnost v tahu než Kevlar 29.



*Obr. 4 Tkanina z aramidových a uhlíkových vláken*

### 1.5.5 Uhlíková vlákna

Mezi vlastnosti uhlíkových vláken patří vysoká pevnost, tepelná rezistence a nízká měrná hmotnost. Z toho vyplývá, že mají nejširší spektrum mechanických vlastností. Nevýhodou je snaha tvořit galvanický článek při styku s některými méně ušlechtilými kovy. Proto se musí kompozit s uhlíkovými vlákny separovat od kovu libovolným nevodivým materiálem, aby nedocházelo k elektrochemické korozi. V praxi nejčastěji separace kompozitem ze skelných vláken. Zvětšení celkové tuhosti uhlíkového vlákna dosáhneme procesy zvanými karbonizace a grafitizace. Při karbonizaci se z mikrostruktury odstraní vodík a celkový obsah uhlíku se pohybuje v rozmezí 80-90% celkové hmoty.



*Obr. 5 Tkanina z uhlíkových vláken*

#### **Hlavní druhy vyráběných uhlíkových vláken:**

- standardní vlákna **HS** („High Strength“) - karbonizovaná
- grafitizovaná vlákna se standardním modulem pružnosti **HM** („High Modulus“)
- vlákna s vysokým modulem pružnosti **VHM** („Very High Modulus“)
- dutá vlákna

Na rozdíl od skleněných vláken mají uhlíková vlákna menší průměr. Vyrábí se tedy z nich různé tkaniny a látky, protože se lépe ohýbají, přestože vykazují vyšší křehkost než skleněná vlákna. Zvláštností je také záporný koeficient teplotní roztažnosti v podélném směru, proto se při zahřívání uhlíkové vlákno zkracuje. Chceme-li u uhlíkových vláken dosáhnout co nejvyšší tuhosti, použijeme pro jejich výrobu odpad

z destilace ropy, tedy dehty. Tímto způsobem lze vyrobit vlákna s modulem pružnosti v tahu  $E$  okolo 900GPa. [8]

Druh vlákna	Sklo	Uhlík HS	Uhlík HM	Aramid
Hustota ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	2500	1600	1700	1500
Pevnost v tahu (MPa)	2100	5000	3800	3000
Modul pružnosti v podélném směru (MPa)	74 000	230 000	390 000	130 000
Modul pružnosti v příčném směru (MPa)	74 000	15 000	6000	5400

*Tab. 2 Porovnání mechanických vlastností skelných, uhlíkových a aramidových vláken [9]*

### 1.5.6 Diskontinuální materiály používané pro vyztužení

Základem je zpevňující složka. Ta je buď ve formě malých částic, nasekaných vláken nebo whiskerů. U tohoto způsobu vyztužení jsou všechny rozměry téměř stejné. Sloučeniny k tomu určené musí vykazovat tvrdost a termodynamickou stabilitu. Nejčastěji se používají karbidy, nitridy a oxidy. Dlouhé uměle připravované monokrystaly oxidu nebo karbidu, kde délka těchto útvarů se pohybuje v rozmezí  $\mu\text{m}$  až  $\text{mm}$ , označujeme jako whiskery. Průměr whiskerů se pohybuje v řádu  $\text{nm}$  až  $\mu\text{m}$ . Výhodou whiskerů je jejich vysoká pevnost v tahu. Ovšem velkou nevýhodou je zpracování whiskerů. Protože to jsou velmi tenké a lehké částičky dochází snadno k jejich vdechnutí a z toho důvodu mohou být rakovinotvorné podobně jako azbest. Musí se tedy dodržovat bezpečnostní opatření, která způsobují celkové zvýšení nákladů na zpracování. Tento typ kompozitů se v letectví téměř nepoužívá.

### 1.5.7 Kompozity za vysokých teplot

Obecně působíme-li na materiál při vysokých teplotách napětím, materiál se plasticky deformuje. Avšak k této deformaci dochází už i při napětích, která jsou nižší, než je napětí v mezi kluzu. Existuje mnoho materiálů, které se užívají při vysokých teplotách, a proto je třeba charakterizovat jejich odolnost proti tečení (creepu). Důležitým parametrem je rychlost tečení. Tuto rychlost ovlivňují materiálové vlastnosti, konstrukční zatížení, doba a teplota, po kterou je materiál vystaven creepu. Je třeba vždy určit velikost deformace, při které zkoušená součást přestává vykonávat svou funkci. Velikost deformace závisí na velikosti a době působícího napětí. Rozlišujeme 3 fáze tečení.

### Primární creep (I)

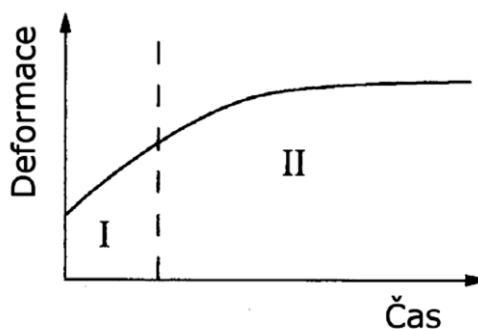
V počáteční fázi tečení dochází k rychlé deformaci. Tato rychlost se postupně s časem snižuje. Snížení rychlosti způsobuje seskupení dislokací do dislokačních formací a ty zabraňují pohybu ostatních dislokací. Tento jev nazýváme deformační zpevnění.

### Stacionární creep (II)

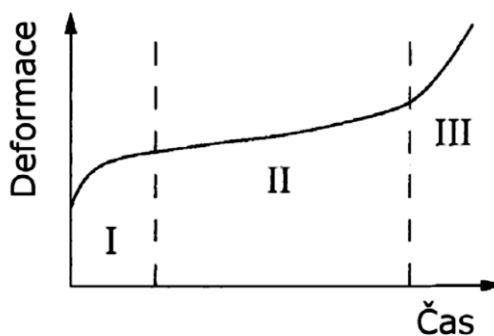
Rychlost deformace se dále snižuje. Postupně se rychlost ustálí a nastane rovnováha mezi deformačním zpevněním a tepelným tečením při dalším zvyšování teploty. Tento rovnovážný stav označujeme jako stacionární creep. V tomto stádiu dochází k různým skluzům a k difuzím po hranicích zrn a k objemovým difuzím.

### Terciální creep (III)

Na počátku poslední fáze tečení dochází k příčnému zužování součásti. Z tohoto důvodu exponenciálně roste rychlost deformace s napětím a dochází ke konečnému prasknutí. Deformace při tečení jsou u kompozitních materiálů mnohem složitější. Je to způsobeno mnoha parametry, především potom povahou výztuže. [7]



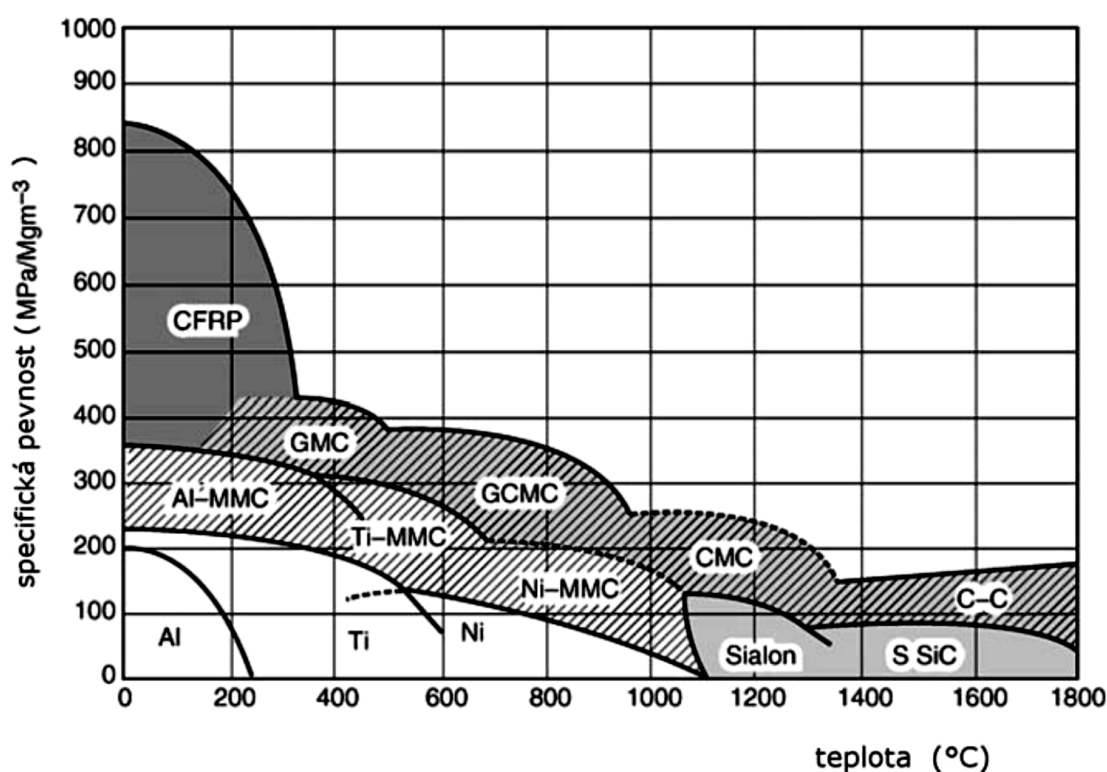
*Graf 1 Znárodnění průběhu deformace při tečení pro kompozity vyztužené vláknově (kontinuálně) [7]*



*Graf 2 Znárodnění průběhu deformace při tečení pro kompozity vyztužené částicemi (diskontinuálně) [7]*

### 1.5.8 Aplikace kompozitních materiálů

Kompozity, které jsou vyztužené kontinuálně i diskontinuálně, nacházejí na trhu široké uplatnění. Běžně se uplatňují v aplikacích, které vyžadují úsporu hmotnosti, odolnost proti opotřebení a teplotní stálost. Matrice těchto kompozitů jsou nejčastěji vyráběny ze slitin hliníku, hořčíku a titanu. Tyto slitiny jsou zpevňovány částicemi karbidu hořčíku, oxidu hlinitého nebo grafitu.



Graf 3 Porovnání materiálů v závislosti specifické pevnosti na teplotě [7]

CFRP – kompozity s polymerní matricí s uhlíkovými vlákny

GMC – kompozity se skelnou matricí

GCMC – kompozity se sklo-keramickou matricí

CMC – kompozity s keramickou matricí

C-C – kompozity s uhlíkovou matricí i uhlíkovými vlákny

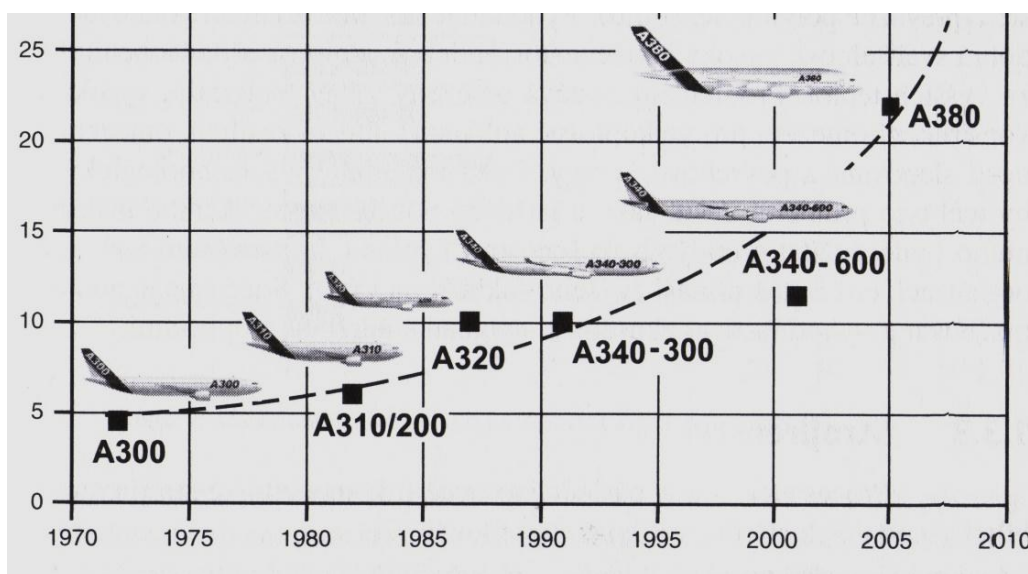
MMC – kompozity s kovovou matricí



## 1.6 Polymerní kompozitní materiály v letectví

Neopomenutelnými faktory při vývoji leteckých konstrukcí je zajištění co nejnížší hmotnosti a obtížnosti výroby. To vše při současném zvyšování spolehlivosti materiálů. Abychom ušetřili přibližně 20% hmotnosti při zdokonalené funkčnosti, využíváme anizotropie epoxidových pryskyřic, které jsou vyztuženy uhlíkovými vlákny. Tím zajistíme výhodný poměr mezi mechanickými vlastnostmi a hmotností. Přesto náklady na výrobu srovnatelných kovových konstrukcí jsou stále nižší.

Podíl uhlíkových kompozitních materiálů v Airbusech neustále roste. V sedmdesátých letech to bylo jen 5%, kdežto na počátku devadesátých let už se tato hodnota pohybovala okolo 10%. Od počátku třetího tisíciletí už tento podíl činí 15% a na novém Airbusu 380 dokonce 22%. Zatím největší podíl kompozitních materiálů obsahuje Boeing 787 a to celých 50%.



Graf 4 Procenta využití uhlíkových kompozitů v konstrukci dopravních letadel [3]

Podíl použití uhlíkových kompozitů v letectví se bude určitě zvyšovat. Vše je ale podmíněno hospodárnou a cenově výhodnou výrobou. Nejčastěji se z uhlíkových kompozitů konstruují výškové a směrové řídicí plochy. Díky technologii pozvolného kladení orientovaných pruhů nebo tvarovaných přířezů, vytvrzovaných v autoklávech za vysokého tlaku a teploty okolo 180°C a používání plošných předimpregnovaných jednosměrně orientovaných vláknitých polotovarů se vyrábějí skořepiny přistávacích

klapek. Vytvrzování trvá několik hodin. Stejnou technologií je vyráběno 80 až 90% uhlíkových kompozitů. Aby bylo možné rozšířit výrobu je zapotřebí zlepšit technologii infuzního prosycování výztuže. Je nezbytné snížit vysoké náklady při řezání a pokládání prepregů a také náklady na skladování prepregových polotovarů z důvodů jejich omezené doby skladovatelnosti. A v neposlední řadě také používání pryskyřic odolných proti vlhkosti při vyšších teplotách, s vysokou houževnatostí a dobrou odolností proti hoření. [3]

### **Prepregy**

Částečně vytvrzené ploché útvary, jejichž hlavní složkou je pryskyřicemi předimpregnovaná výztuž, označujeme jako prepregy. Jsou to vlastně polotovary ve tvaru listu, které můžeme dále vrstvit na sebe až do požadované tloušťky. Tvarujeme je ve formách a lze je dotvrdit za pomoci tepla, popřípadě i tlaku. [11]

Prepregy se používají jako polotovary k výrobě špičkových polymerních kompozitních materiálů. Základem prepregů jsou rovingy, na které se nanáší reaktoplast. Rovingy jsou vlákna sdružená do kabelu s minimálním počtem zákrutů. Na paralelně vedené rovingy se při výrobě prepregů nanáší vrstva pryskyřice ve stavu lepidivého gelu. Existuje obrovská škála používaných pryskyřic, jako jsou epoxidové, fenolformaldehydové, polyamidové, nebo ftalonitrilové.

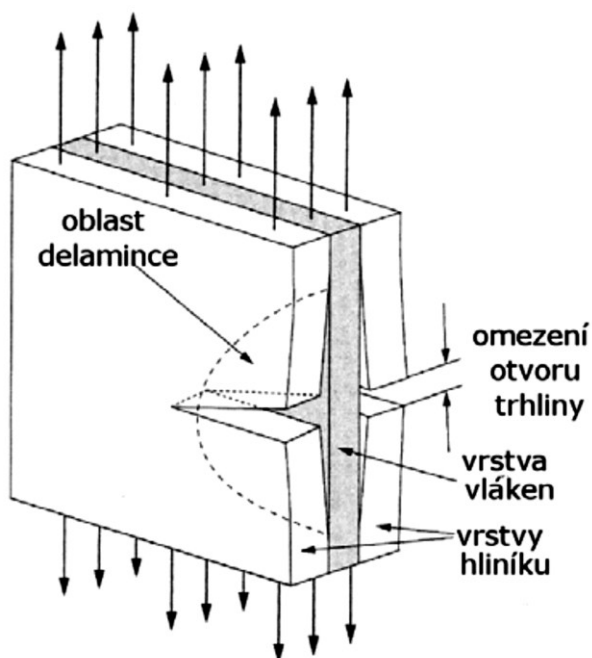
Na jedné straně prepregu se nachází nosná a na druhé separační fólie. Životnost prepregů závisí na typu použitého reaktoplastu. Nevýhodou prepregů je jejich nestálost při běžných teplotních podmínkách, při kterých dochází k pomalému vytvrzování pryskyřice. Tím se sníží lepivost, což má za následek zvýšení nebezpečí tvorby vzduchových polštářů mezi pokládanými vrstvami a také dochází k posouvání těchto vrstev. Proto se prepregy ve vodotěsných obalech často skladují v mrazících boxech při teplotách okolo  $-18^{\circ}\text{C}$ . Při opětovném vyndání z mrazících boxů je zapotřebí prepreg pozvolně zahřát na pokojovou teplotu, aby nedošlo k navlhnutí reaktoplastové matrice nebo samotných vláken. Při spojovacím procesu je potom zapotřebí matici natavit, aby se spojila nová a předchozí vrstva. [8]

## 1.7 Lamináty typu GLARE a ARALL

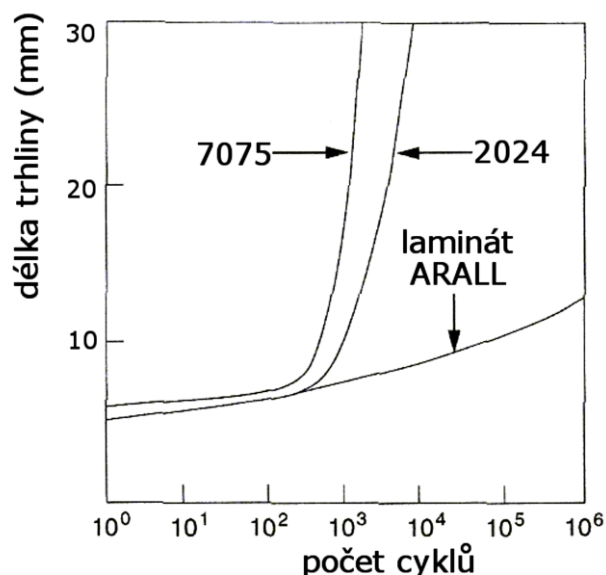
Mezi další materiály vhodné pro praktické užití v letectví jsou lamináty GLARE a ARALL. Oba tyto lamináty jsou vyrobeny na principu kov-polymer. Jak GLARE, tak i ARALL je tvořen vrstvami hliníkové slitiny 2024-T3. U kompozitu ARALL jsou tyto hliníkové vrstvy spojeny vláknově zpevněnými epoxydovými pryskyřicemi. Objem lepidlové vrstvy je z poloviny složen z aramidových vláken. Aramidová vlákna jsou význačná vysokým modulem pružnosti.

Aramidová vlákna jsou u kompozitu GLARE nahrazena skleněnými vlákny. Až 60% objemu lepidlové směsi tvoří skleněná vlákna, která jsou orientovaná do jedné, nebo do dvou os. Lamináty GLARE jsou pevnější v podélném i příčném směru než ARALL, a to z důvodu vyšší pevnosti skleněných vláken.

Obrovskou výhodou laminátů GLARE i ARALL je jejich schopnost zabránit šíření lomu. Plechem ze slitiny hliníku se může šířit únavový lom bez omezení, až dojde k celkovému porušení panelu. Tento lom probíhá pouze v hliníkových deskách. Vlákna zůstávají nepoškozena z důvodu jejich vysoké pevnosti a tuhosti. Šíří-li se laminátem trhlinka, vlákna ji přemostují. Vlákna přenášejí zvětšující se podíl zatížení, tím snižují intenzitu napětí na vrcholu trhliny a tím zastavují její další šíření.



Obr. 6 Schéma delaminace laminátu ARALL [7]



*Graf 5 Srovnání délky trhlin v závislosti na počtu cyklů únavové zkoušky u laminátu ARALL a hliníkových slitin 2024 a 7075 [7]*

Z grafu je jasné patrné, že spolehlivost a životnost laminátu ARALL je daleko vyšší než životnost v letectví běžně používaných hliníkových slitin. Další nespornou výhodou je jejich nižší hmotnost a zároveň vyšší schopnost odolávat nárazům a poškození než je tomu u hliníkových slitin. Konstrukteři už také našli způsob, jak vyrábět vysokoteplotní verze těchto kompozitů. Zvýšení tepelné odolnosti je docíleno přidáním titanu, uhlíkových vláken a termoplastové pryskyřice. [7]

## 2 Použití vybraných materiálů na letounech A380 a B787

### 2.1 Airbus 380

Airbus 380 je největší současné dopravní letadlo na světě, vyráběné společností Airbus Scandinavian Airlines System. První prototyp byl vyroben v Toulouse na jihozápadu Francie. Letadlo má dvě paluby pro cestující a je poháněno čtyřmi turbodmychadlovými motory. Může pojmout až 853 cestujících. Maximální dolet Airbusu A380 je 15 700 m. Nejvíce letounů A380 provozují společnosti Emirates, Singapore Airlines, Qantas, Air France a Lufthansa. Celková délka letounu činí 72,72m a v nejširším místě má trup poloskořepinové konstrukce průměr 7,14m.



*Obr. 7 Poloskořepinová konstrukce trupu A380 [23]*

Je pochopitelné, že největší dopravní letadlo světa, potřebuje křídla odpovídající velikosti. Plocha křídel činí celých  $850\text{m}^2$  a rozpětí křídel dosahuje 79,75m. Díky tomu dokáže vzlétnout Airbus o vzletové hmotnosti 560t. Pokud by výrobci zachovali tradiční poměr délky Airbusu k rozpětí křídel, letoun A380 by neměl ani zdaleka takové využití, protože by jeho rozpětí nevyhovovalo mezinárodním předpisům vydávaným organizací ICAO. Tento limit je stanoven na 80m, aby nedocházelo ke srážkám na pojezdnicích plochách. Proto stál před konstruktéry Airbusu úkol sestavit letoun s kratším rozpětím křídel, avšak se stejnou vzletovou hmotností.

Jelikož na koncích křídel působí indukovaný odpor, který snižuje celkový vztlak, museli konstruktéři najít řešení, které by tento nežádoucí jev potlačilo. Proto se na koncích křídel letounu A380 používají tzv. winglety, které už byly dříve použity na některých starších letounech.

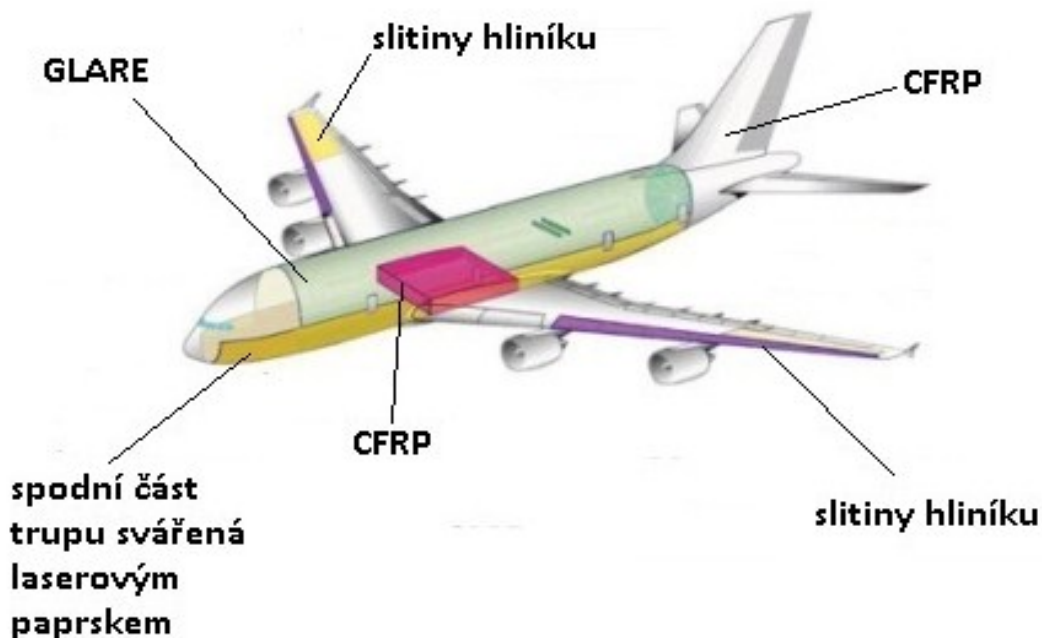
Při konstrukci Airbusu A380 byly na výrobu primární konstrukce křídel, centropłanu a také ocasních částí použity převážně slitiny hliníku společně s kompozitními materiály. Využití nacházejí také polymerní kompozity s uhlíkovými vlákny, ze kterých jsou vyrobeny například nosníky podlahy horní paluby cestujících.

Náběžné hrany křídel jsou konstruovány ze slitin hliníku. Na prvních několika letounech A380 bylo uchycení křídel k trupu vyráběno z nových hliníkových slitin s označením 7449, které byly vyztužené uhlíkovými vlákny. Ovšem začaly se objevovat malé trhlinky, a proto byl tento materiál nahrazen vysoko pevnostní hliníkovou slitinou 7040, která je ovšem těžší. Tato slitina se také používá pro několik aplikací v trupu letounu.

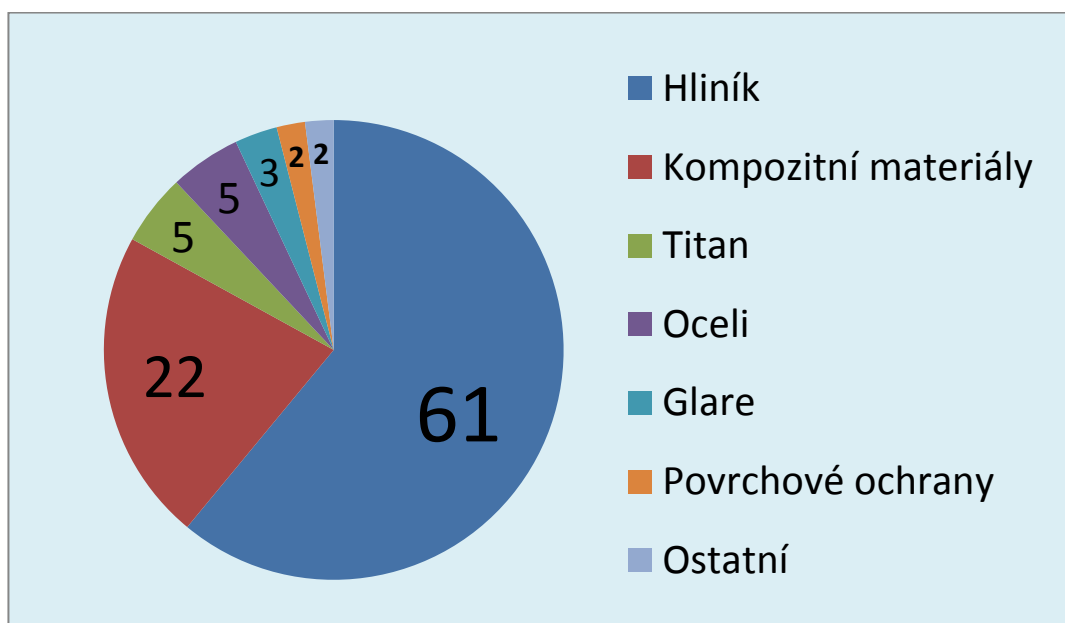
Protože celková plocha vnějšího potahu měří  $3000\text{m}^2$ , bylo zapotřebí snížit hmotnost letounu, ale současně zachovat dostatečnou pevnost a tím neohrozit bezpečnost letadla. Aby plášť mohl být zkonstruován z hliníkových slitin a současně splňoval hmotnostní požadavky, musel by se použít plech o tloušťce 1mm. Tento plech by však nesplňoval pevnostní požadavky, a proto museli pro výrobu letounu A380 hledat jiný materiál. Nakonec se rozhodli pro použití skelného vlákna.

Skelné vlákno vykazuje vysokou pevnost v podélném i příčném směru. Laminovali tedy skelné tkaniny za použití pryskyřice. Pevnost od normálních skelných vláken (rohoží) se liší z důvodu zamezení šíření trhlinek způsobené malým průřezem vláken. Ještě lepších vlastností dosahuje tento materiál ve spojení s hliníkem. Výsledkem je materiál označovaný GLARE, kde jsou vrstvy sklolaminátu prokládány hliníkovou fólií. Důležitá je také orientace jednotlivých vrstev skelné tkaniny. Na potah poloskořepinového trupu bylo použito více než  $470\text{m}^2$  kompozitu s vyztužením typu GLARE, což má za následek celkové snížení hmotnosti letounu až na současných 276,8t. Zajímavostí je, že pouhý nátěr celého povrchu letounu se provádí ve třech vrstvách a celková hmotnost použité barvy činí 500kg.

Také titan byl použit na konstrukci A380, především potom na různé motorové součástky. Z titanu je vyrobeno také čepové kování a uchycení klapky č. 3 na odtokové hraně. Některé součásti sloužící k uchycení motoru a součásti podvozku jsou rovněž vyrobené z titanu. [12, 13, 14]



Obr. 8 Rozložení vybraných materiálů na letounu A380 [24]



Graf 6 Materiály použité na konstrukci A380 v % [25]



## 2.2 Boeing 787 Dreamliner

Letecký průmysl začal mít poslední dobou značné problémy a to především z důvodu neustálého zvyšování cen paliva. Klíčem k úspěchu tedy musí být celkové snížení hmotnosti letadel. S odpovědí na tento problém přispěla jako první společnost Boeing s letounem Boeing 787 Dreamliner. Velikostí se řadí mezi střední letadla a kapacita letounu se pohybuje od 210 do 290 sedadel.

Celková délka letounu dosahuje 56,7m. Rozpětí křídel je 60m a průměr trupu v nejširší části činí 5,77m. Hmotnost prázdného Boeingu 787 nepřesahuje 110 000kg. S plnými nádržemi doletí B787 až do vzdálenosti 15 200m.

Boeing 787 spotřebuje o pětinu méně paliva než jeho předchůdce B767. Na konci srpna 2011 po mnoholetých zkouškách obdržel B787 osvědčení o letové způsobilosti. Osvědčení vydal Federální úřad pro letectví a Evropská agentura pro bezpečnost v letectví. První společností, která letoun začala provozovat, byla společnost All Nippon Airways a to se uskutečnilo 26. Října 2011.

Už ze samotného názvu vyplývá fakt, že by se mělo jednat o nový letoun, u kterého by mělo dojít k radikální změně. A také se tak stalo díky revolučnímu materiálovému složení, kde obvyklá primární kovová konstrukce dopravních letounů byla nahrazena kompozitními materiály. Množství kompozit na letounu dosahuje 50% primární struktury, která zahrnuje trup i křídla. Nejvíce zastoupeným kompozitním materiálem jsou polymery vyztužené uhlíkovými vlákny (CFRP - carbon-fiber-reinforced polymer).

Kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny mají potenciál stát se nejpoužívanějším konstrukčním materiálem. Hlavní výhodou je jejich nižší hmotnost oproti hliníkovým slitinám a zároveň také vykazují vyšší pevnost. Aby se kompozity používané na Dreamlineru staly certifikovaným materiálem pro letectví, musely projít těmito zatěžovacími testy:

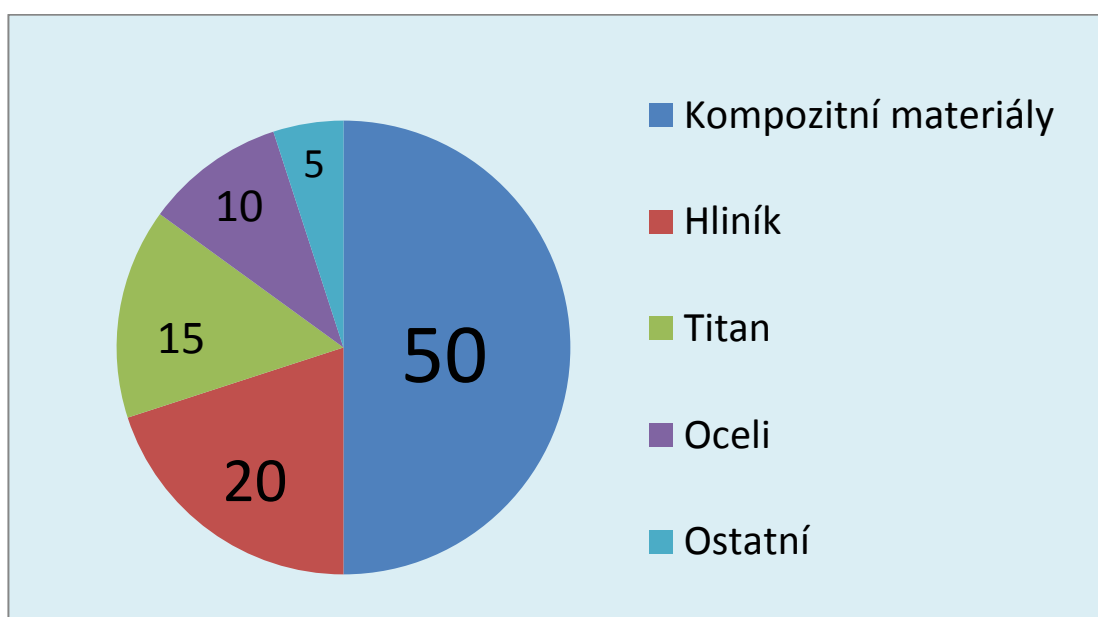
- Oheň, kouř, toxicita – Kompozity musí být odolné proti vzplanutí do určité teploty. Pokud vzplanou, musí se plamen šířit pomalu. Navíc, když kompozitní materiál hoří, nesmí produkovat žádné toxické látky ani kouř.
- Chemická odolnost – Kompozitní materiály použité na B787 musí být nepropustné pro širokou škálu chemických látek, které se nacházejí v letadle. Samozřejmě zde patří palivové a hydraulické kapaliny.

- Absorpce vody – Všechny kompozitní materiály nesmí ve vzdušném prostoru absorbovat vlhkost.
- Kontrola kvality výroby – Každý komponent používaný pro Dreamliner, musí splňovat velmi přísné výrobní normy a musí být tento výrobní proces kontrolován. [15]

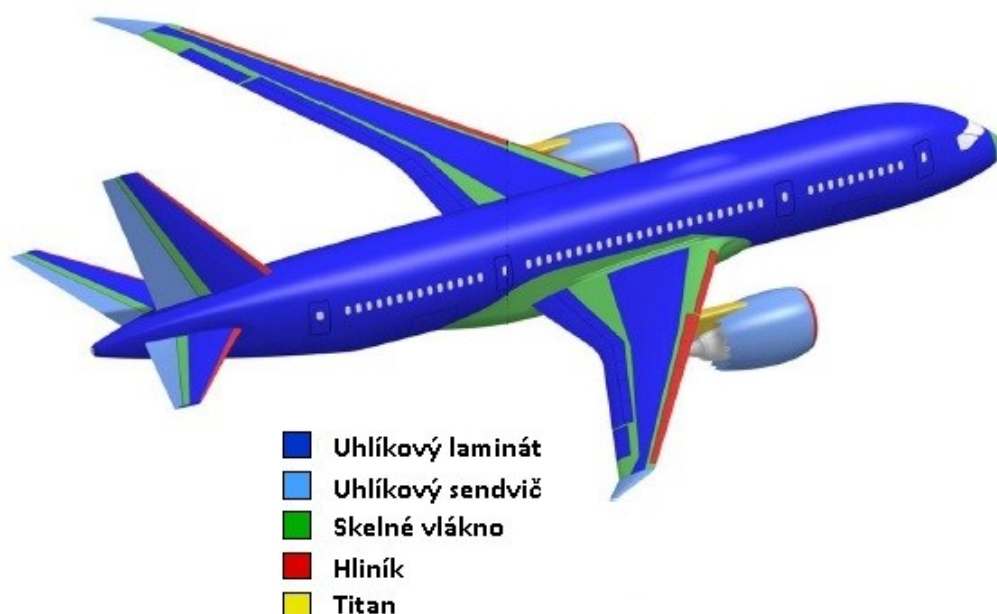
Stejně jak při výrobě malých, tak i při výrobě velkých letounů je zapotřebí vybrat optimální materiál pro konkrétní aplikaci. To znamenalo analyzovat každou část draku letounu a určit nejvhodnější materiál vzhledem k provoznímu prostředí a zatížení, kterému musí konstrukce čelit během provozu. Kompozitní materiály ve srovnání s hliníkovou konstrukcí mají nižší nároky na údržbu v důsledku únavy.

Ze stejného důvodu se na letounu B787 zvýšilo množství použitého titanu. Titan ve srovnání s hliníkem vykazuje lepší vlastnosti v únavových zkouškách a také je vysoce odolný proti korozi. Titan byl použit především na motorech a také jako spojovací materiál. Celkové množství titanu na Dreamlineru dosahuje 15%. Ocel je zastoupena 10% a to především na podvozkových nohách. [16]

Slitiny hliníku byly použity především pro náběžné hrany křídel a ocasních ploch. Celkové procento hmotnostního zastoupení hliníku na letounu B787 dosahuje 20%. Oproti předešlým modelům došlo k výraznému úbytku, ovšem stále hliník tvoří celou pětinu hmotnosti letounu.



*Graf 7 Materiály použité na B787 v % [26]*



*Obr. 9 Použití materiálů na konstrukci draku a potahu letounu B787 [27]*

V současnosti mají všechny letouny B787 zákaz létat z důvodu problému s lithium - iontovými bateriemi. Ty sice vykazují větší kapacitu než předešlé typy baterií, ale dochází k jejich přehřívání a může dojít ke vzniku požáru. Konstrukteři se tedy snaží tento problém odstranit. V současné době už stroje s novými bateriemi létají zkušební lety a čeká se, až absolvují povinné zatěžovací testy. Teprve poté Federální úřad pro letectví udělí potřebná povolení, díky kterým se Dreamlinery budou moci vrátit do vzduchu. [17]

### **3 Prognóza dalšího vývoje materiálů v letectví**

Není snadné určit, jakým směrem se bude vyvíjet letectví v oblasti konstrukčních materiálů. Proto jsem se pokusil nahlédnout, jak tomu bylo u výroby ultralehkých letadel. Dříve byly používány kovové materiály, ale postupem času se začaly prosazovat kompozitní materiály a nyní lze říci, že kompozity tvoří naprostou většinu součástí ultralehkých letadel.

#### **3.1 Výroba ultralehkého letounu**

Jak jsem se přesvědčil na vlastní oči, vyrobit ultralehký letoun, který by odpovídal kritériím požadované kategorie, není vůbec snadný úkol. V první řadě je zapotřebí sestavit schopný tým, v jehož čele je člověk, který má s výrobou daného typu letitou zkušenost. Ten má za úkol vypracovat projekt, který bude mít naději na úspěch. Projekt vždy závisí na finančních možnostech a také na poskytnutém času pro realizaci. Ovšem nejdůležitější jsou peníze. Je-li dostatečné množství finančních prostředků, lze pro konstrukci použít nejnovější materiály a také najmout větší množství kvalifikovaných konstruktérů, a tím urychlit výrobní proces.

Výrobní proces se skládá z několika fází. Nejprve je zapotřebí vyrobit tzv. „pozitivní kopyto“. Pozitivním kopytem se rozumí předloha vyráběné součásti, která se vyřezává z umělého dřeva. Důvod použití umělého dřeva je prostý. Umělé dřevo nepodléhá procesům stárnutí a nedochází k jeho zkroucení či sesychání. To nám zaručí možnost delšího skladování kopyta. Hlavním požadavkem na výrobu kopyta je jeho přesnost a hladkost povrchu. Podle kopyta se poté vyrábí negativní forma určená k laminování. Tato forma prochází svým vlastním výrobním procesem a je zapotřebí, aby došlo k dostatečnému vytvrzení formy.

Aby forma byla použitelná k dalšímu procesu, je třeba ji řádně chemicky očistit a vytvořit na povrchu vrstvu, která bude selektovat formu od laminátu. V další fázi už dochází k laminování samotnému, kde se nanášejí jednotlivé vrstvy zvolených tkanin a prokládají se nátěrem pryskyřice. Je důležité tkaninu dobře prosytit. Podle potřeby se používají tkaniny z uhlíkových, skelných nebo aramidových vláken. Přímo do laminátu lze také vkládat nosníky či jiné potřebné součásti. Po skončení prosycování se z formy odsává vzduch, aby v laminátu vznikl podtlak, který stlačuje jednotlivé vrstvy směrem k formě. Tímto způsobem docílíme minimálního průřezu laminátu. Poté necháme

kompozit vytvrdnout za běžných teplot. Tento způsob laminování nazýváme laminování za studena. Po vytvrdnutí vyjmeme kompozitní součást z formy.

Nejnáročnější je vyrobit celokompozitní trup, který obsahuje velké množství přepážek. Vnitřní část trupu se vždy vyztužuje aramidovými vlákny z důvodu zabránění lomu konstrukce a tím ohrožení posádky. Je zapotřebí při procesu laminování dodržet přesně stanovený postup, protože po zatvrdnutí nelze dodatečně laminovat další součásti. Proto je zapotřebí vše udělat na první pokus, aby se konstrukční díl nemusel vyrábět znovu. To má za následek zvýšení nákladů a samozřejmě také časové prodloužení výroby.

V praxi, hlavně v malosériové výrobě, se ovšem vždy vyskytují chyby, ať už jde o chyby v návrhu letounu, anebo chyby při výrobě. Často se totiž stává, že po složení všech dílů konstruktéři zjistí, že letadlo je moc těžké, a proto dochází k redukci hmotnosti. Přepočítává se, jestli by se nemohl zkrátit trup, křídlo, výškové kormidlo, či jiná součást. Také se uvažuje nad použitím jiných materiálů pro danou aplikaci. Výroba ultralehkého letounu není věc lehká a množství všech těchto problémů lze minimalizovat většími zkušenostmi projektantů a konstruktérů.

### **3.2 Dopravní letadla**

U velkých dopravních letadel se trend používání kompozitů vyvíjel obdobně jako u ultralehkých letounů. První používání kompozitních materiálů pro konstrukce dopravních letadel sahá až k počátkům letounů Boeing 737 a 747, kde hmotností procento kompozitů tvořilo 5% letadla. Celých těchto 30 let se hmotnostní procento aplikace kompozitu zvyšovalo úměrně s vyvíjením nových technologií pro jejich výrobu. Dnes na Airbusu A380 je více než 30t kompozitů a u další chystané verze A350EWB má množství kompozitů dále růst. Důvodem je snížení celkové hmotnosti letadel. Pokročilých kompozitů se využívá také ve vojenských letounech k dosažení lepších výkonů a funkčních parametrů. Díky tomu mají vojenská letadla snížený odpor, nízkou radarovou pozorovatelnost nebo lepší odolnost proti teplotám při vysokých rychlostech. Další vojenské využití nacházejí kompozity při výrobě rotorových listů u vrtulníků. Zde nahrazují hliníkové konstrukce z důvodu desetinásobné odolnosti proti únavovému poškození.

Další nespornou výhodu zjistila společnost Boeing experimentem, kdy nahradila 11 000 nekompozitních dílů 1500 kompozitními díly. Tím ušetřila téměř 90% spojovacích materiálů, které by byly zapotřebí při výrobě celokovového letounu.

Inovace ve výrobních procesech mohou přispět ke snížení nákladů při výrobě drahých leteckých prepregů oproti pokročilým kompozitním materiálům. Vyšší efektivitu výroby lze zajistit konstrukční optimalizací nebo novými výrobními procesy jako jsou nové lisovací metody, použitím termoplastů nebo metodou uzavřeného lití. Proto se v dnešní době hodně lidí zaměřuje především na zkoušení nových výrobních procesů, než na výrobu nových slitin.

Samozřejmě nepokračuje vývoj pouze mezi kompozitními materiály, ale také mezi kovovými. Postupně se dostávají na povrch výsledky vývoje kosmických, či vojenských programů. Jedním z nejnovějších témat, je použití lithiových slitin, především z důvodu nízké měrné hmotnosti.

Novější regionální typy letadel **Bombardier C-Series** nebo **Mitsubishi Regional Jet** vsadily na kovovou konstrukci trupu a je tedy otázkou, jaký bude další vývoj materiálů. Jistotou ovšem zůstává fakt, že konstrukce dopravních letadel budou i nadále hybridní. Proto je zapotřebí najít cestu ke správnému kombinování kompozitů, hliníkových slitin, titanu, případně oceli. [18]

### 3.2.1 Bombardier CSeries

Série dvoumotorových letadel s úzkým trupem, středního doletu, je vyvinuta kanadským výrobcem Bombardier Aerospace, který je v dnešní době považován za třetího největšího výrobce letadel na světě. V listopadu 2012 Bombardier oznámil, že by se první let verze CS100 mohl uskutečnit v červnu letošního roku a do provozu by mohl být uveden v roce 2014. Celý tento projekt spolufinancují vlády Kanady a Velké Británie. Letadla Bombardier CSeries se vyznačují vlastnostmi podobnými letounům Boeing 787 Dreamliner a Airbus A350, jako je velké využití kompozitních materiálů, větší prostor a samozřejmostí jsou i velká okna.



*Obr. 10 Bombardier CSeries [21]*

Letadlo CSeries je ze 70% vyrobeno z pokročilých materiálů, které tvoří 46% kompozitních materiálů a 24% hliníko-lithiových. To vše způsobuje o 15% nižší náklady v přepočtu na jedno sedadlo a také značné snížení nákladů na údržbu. Dále společnost slibuje větší komfort pro každého zákazníka díky širší uličce, prostornějším policím pro příruční zavazadla a širokému trupu. [19]

### 3.2.2 Mitsubishi Regional Jet

Přestože se o Japonských letounech v civilním letectví do této doby moc nemluvalo, má tomu být během několika málo let jinak. V letošním roce by měl podle vyjádření Mitsubishi Aircraft Corporation poprvé vzlétnout letoun Mitsubishi Regional Jet, který bude konstruován pro 70-90 pasažérů. Uvidíme, jestli se společnosti podaří dodržet termín a nenastanou komplikace. V roce 2015 by společnost All Nippon Airways měla jako první začít používat tyto letouny.



*Obr. 11 Mitsubishi Regional Jet [22]*

Navzdory původním předpokladům, že trup letounu bude tvořen převážně kompozitními materiály s uhlíkovými vlákny, výrobce došel k názoru, že lepším řešením bude hliník. Uhlíkové kompozitní díly budou tvořit pouze 10-15% letadla a to vodorovné a svislé ocasní plochy. Výrobce upozorňuje, že změny nebudou mít žádný vliv na slibovanou nízkou spotřebu paliva, hluk i emisní limity a neovlivní ani vysoký komfort letounu.[20]



## **Závěr**

Cílem mé práce bylo seznámit se s konstrukčními materiály, které se v současnosti používají při konstrukci letadel, tyto materiály porovnat z hlediska jejich použití a určit do jaké míry se vybrané materiály vyskytují na dopravních letounech typu A380 a B787. Na závěr se pokusit určit, jakým směrem se bude v budoucnu vyvíjet výroba dopravních letadel z hlediska materiálového použití.

V první části jsem popsal materiály, které se ve velké míře používaly v leteckém průmyslu. Postupně jsem přecházel k novějším materiálům, které jsou používány v současnosti nebo budou používány i v budoucnosti, tedy kompozity a lamináty.

Další část byla věnována popisu letadel typu A380 a B787 a porovnání zastoupení vybraných materiálů, použitých při jejich konstrukci.

Při zpracovávání této práce jsem využil poznatků získaných z exkurze z výroby ultralehkého letounu v Šumperku. Na základě těchto poznatků jsem se mohl pokusit srovnat výrobu ultralehkého letounu s dostupnými informacemi o výrobě velkých dopravních letadel.

Na závěr jsem uvedl dva příklady budoucích typů letadel, u kterých je vysoká pravděpodobnost jejich uplatnění na trhu, v důsledku optimální kombinace pokročilých kompozitních materiálů a kovových slitin.

## Seznam zdrojů

- [1] HLUCHÝ, Miroslav; *Strojírenská technologie 1.* - vydání 4. – Praha: Scientia, 2007 – 266 s. ISBN 978-80-86960-26-5
- [2] FIALA, Jaroslav; MENTL, Václav; ŠUTTA, Pavol. *Struktura a vlastnosti materiálů.* - vydání 1. - Praha: Academia, 2003 - 572 s. ISBN 80-200-1223-0
- [3] Ehrenstein, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály.* - v ČR 1. vydání - Praha : Scientia, 2009 - 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6
- [4] <<http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/databaze.../Slitiny%20Al.doc>> [ke dni 26.4.2013]
- [5] <[http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy\\_II/titan\\_vlastnosti\\_pouziti\\_slitiny.pdf](http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/titan_vlastnosti_pouziti_slitiny.pdf)> [ke dni 26.4.2013]
- [6] <<http://www.mmspektrum.com/clanek/problematika-obrabeni-titanovych-leteckych-dilu.html>> [ke dni 26.4.2013]
- [7] <<http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/PGM/Progresivni%20materialy.pdf>> [ke dni 26.4.2013]
- [8] <<http://www.volny.cz/zkoriek/vlakna.pdf>> [ke dni 26.4.2013]
- [9] <<http://www.kme.zcu.cz/download/predmety/229-umm-6.pdf>> [ke dni 26.4.2013]
- [10] <<http://www.historieletectvi.xf.cz/index1.htm>> [ke dni 26.4.2013]
- [11] <<http://www.havel-composites.com/clanky/0-/74-Vseobecny-a-zakladny-popis-materialov-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitov.html>> [ke dni 26.4.2013]
- [12] <<http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a380family>> [ke dni 26.4.2013]
- [13] <<http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=227>> [ke dni 26.4.2013]
- [14] <[http://en.wikipedia.org/wiki/Airbus\\_A380](http://en.wikipedia.org/wiki/Airbus_A380)> [ke dni 26.4.2013]

- [15] <<http://composite.about.com/od/applications/a/What-Is-The-787-Dreamliner.htm>> [ke dni 26.4.2013]
- [16] <[http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr\\_4\\_06/article\\_04\\_2.html](http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html)> [ke dni 26.4.2013]
- [17] <<http://www.denik.cz/ekonomika/testovaci-let-dreamlineru-skoncil-uspechem-boeing-chysta-dalsi-20130326.html>> [ke dni 26.4.2013]
- [18] <[http://www.alv-cr.cz/download/SVA\\_2009.pdf](http://www.alv-cr.cz/download/SVA_2009.pdf)> [ke dni 26.4.2013]
- [19] <[http://en.wikipedia.org/wiki/Bombardier\\_CSeries#cite\\_note-bcs-51](http://en.wikipedia.org/wiki/Bombardier_CSeries#cite_note-bcs-51)> [ke dni 26.4.2013]
- [20] <<http://www.flightglobal.com/news/articles/aa09-mitsubishi-unveils-major-changes-to-mrj-programme-332045>> [ke dni 26.4.2013]
- [21] <<http://flyawaysimulation.com/downloads/files/4473/fsx-bombardier-house-colors-cseries-cs100>> [ke dni 26.4.2013]
- [22] <<http://www.flightglobal.com/blogs/aircraft-pictures/2010/06/mitsubishi-regional-jet.html>> [ke dni 26.4.2013]
- [23] <<http://www.airbus.com/galleries/photo-gallery/?p=139#open=galleries/photo-gallery/dg/idp/21113-a380-fuselage-sections-at-fal>> [ke dni 26.4.2013]
- [24] <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003436170870273X>> [ke dni 26.4.2013]
- [25] <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353804003367>> [ke dni 26.4.2013]
- [26] <[http://bintang.site11.com/Boeing\\_787/Boeing787\\_files/Specifications.html](http://bintang.site11.com/Boeing_787/Boeing787_files/Specifications.html)> [ke dni 26.4.2013]
- [27] <<http://www.1001crash.com/index-page-composite-lg-2.html>> [ke dni 26.4.2013]

## Seznam obrázků

Obr. 1 Příklad součásti vyrobené z titanu .....	19
Obr. 2 Typy zpevňujících složek kompozitů .....	23
Obr. 3 Tkanina ze skelných vláken .....	24
Obr. 4 Tkanina z aramidových a uhlíkových vláken .....	25
Obr. 5 Tkanina z uhlíkových vláken .....	26
Obr. 6 Schéma delaminace laminátu ARALL .....	32
Obr. 7 Poloskořepinová konstrukce trupu A380 .....	34
Obr. 8 Rozložení vybraných materiálů na letounu A380 .....	36
Obr. 9 Použití materiálů na konstrukci draku a potahu letounu B787 .....	39
Obr. 10 Bombardier CSeries .....	43
Obr. 11 Mitsubishi Regional Jet .....	44

## Seznam grafů

Graf 1 Znázornění průběhu deformace při tečení pro kompozity vyztužené vláknově (kontinuálně) .....	28
Graf 2 Znázornění průběhu deformace při tečení pro kompozity vyztužené částicemi (diskontinuálně).....	28
Graf 3 Porovnání materiálů v závislosti specifické pevnosti na teplotě .....	29
Graf 4 Procenta využití uhlíkových kompozitů v konstrukci dopravních letadel.....	30
Graf 5 Srovnání délky trhlin v závislosti na počtu cyklů únavové zkoušky u laminátu ARALL a hliníkových slitin 2024 a 7075.....	33
Graf 6 Materiály použité na konstrukci A380 v % .....	36
Graf 7 Materiály použité na B787 v % .....	38

## Seznam tabulek

Tab. 1 Složení, vlastnosti a použití titanových slitin .....	21
Tab. 2 Porovnání mechanických vlastností skelných, uhlíkových a aramidových vláken .....	27